

Handbuch Ökologische Durchgängigkeit

Anhang „Raugerinne“

Kapitel „Raugerinne mit Beckenstruktur (RGmBS)“

Bemessungshinweise für die Steinriegel bei Raugerinnen mit Beckenstruktur

1. Allgemeine Erwägungen
2. Planung mit angemessenen Steingrößen
3. Beiwert für zusätzlichen Abfluss durch Lücken zwischen den Steinen bei Steinriegeln aus Naturstein (Faktor f) in Raugerinnen mit Beckenstruktur
4. Überströmung von Steinriegeln für Raugerinne im Hauptschluss
5. Vermeidung von Niedrigwasserschwellen

1 Bezug zum DWA-M 509 (2014)

1.1 Allgemeine Erwägungen

Die Gestaltung von Raugerinnen mit Beckenstruktur wird im DWA-M 509 (2014) an verschiedenen Stellen angesprochen. DWA-M 509 (2014), Kap. 7.6.2 enthält Vorgaben für Stabilitätsbetrachtungen, Kap. 7.11.7 Hinweise zu Steingrößen und Kap. 7.11.8. Hinweise zum filterstabilen Aufbau von Raugerinnen. Aus Sicht von BAW und BfG sind diese Vorgaben teilweise nicht ausreichend.

1.2 Steingröße

Die Aussagen im DWA-M 509 (2014) sind nicht eindeutig. Auf S. 199 wird darauf hingewiesen, dass „die realisierbare Höhe der Riegel begrenzt“ ist.

1.3 Faktor f (Beiwert für Abfluss durch Lücken zwischen Riegelsteinen)

DWA-M 509 (2014) Kap. 7.6.3:

Bei Steinriegeln aus Natursteinen sind, unabhängig von den geplanten Öffnungen für die Passage der Fische, zusätzliche Lücken zwischen den Steinen abflussrelevant, die durch das unregelmäßige Natursteinmaterial entstehen. Das DWA-M 509 (2014) berücksichtigt Abflüsse in den Lücken zwischen den Steinen eines Steinriegels im Raugerinne mit Beckenstruktur in Form eines Faktors f (Kap. 7.6.3, S.187, Gleichung 7.23). Dieser Faktor wird in Abhängigkeit von den Bruchkanten der verwendeten Steine (gerade/unregelmäßig) mit 1,05 – 1,15 angegeben.

1.4 Überströmung von Steinriegeln

DWA-M 509 (2014) Kap. 7.6.1:

„Wenngleich der Abfluss primär durch diese Durchlässe erfolgt, ist zusätzlich eine Überströmung der Riegel möglich. [...] Bei steileren Raugerinnen kann es die hydraulische Auslegung erfordern, dass die Riegel während niedriger Abflüsse um ein bestimmtes Maß aus dem Wasser herausragen und erst bei hohen Abflüssen überströmt werden. Derartige Raugerinne neigen verstärkt zu Verklausungen mit Treibgut. Daher sowie aus optischen Gründen sollten die Steine bei Q_{30} nur wenig die Wasseroberfläche überragen. Eine flachere Gestaltung eines Raugerinnes erlaubt eine Überströmung der Riegel bereits im unteren Abflussbereich, wodurch Geschwemmsel und Treibholz besser über das Bauwerk abgeführt werden.“

DWA-M 509 (2014) Kap. 7.6.2:

„Die Riegel werden so angeordnet, dass sie bei geringen Abflüssen durchströmt und erst bei größeren Abflüssen auch überströmt werden.“

DWA-M 509 (2014) Kap. 7.6.3:

„In Abhängigkeit von den Relationen h_o/h_s und L_b/h_s bilden sich in den Beckenstrukturen unterschiedliche Fließverhältnisse aus:

- Bis $h_o/h_s = ca. 1,5$ liegt ein typischer Beckenabfluss vor, bei dem die hydraulische Energie fast vollständig im Beckenvolumen umgewandelt wird und der Wasserspiegel in den Becken vereinfacht als horizontale Ebene betrachtet werden kann (Bild 187a).
- Bei Werten von h_o/h_s größer 1,5 bis ca. 2 liegt ein stark gewellter Abfluss vor, bei dem die Becken für eine vollständige Energieumwandlung bereits zu klein sind (Bild 187b).
- [...]

Ein Raugerinne kann die Anforderungen für den Fischaufstieg nur so lange erfüllen, wie sich ein Beckenabfluss gemäß Bild 187a einstellt.“

1.5 Niedrigwasserschwellen

DWA-M 509 (2014) Kap. 7.6.2:

„Steht nur ein geringer Betriebsdurchfluss zur Verfügung, kann es erforderlich sein, die Durchlässe mit einer aus niedrigen Steinen gebildeten Grundschwelle anzuheben, um auch bei geringen Abflüssen ausreichende Wassertiefen in den Becken zu erzeugen (Bilder 186 und 189). Diese auch als Niedrigwasser(NW)-Schwelle bezeichnete Grundschwelle ist stets zerklüftet auszubilden, damit schwimmschwache, bodenorientierte Fische und benthale Wirbellose eine ausreichend geringe Fließgeschwindigkeit und Halt an der Sohle vorfinden und die Öffnung zum nächsten Becken passieren können.“

DWA-M 509 (2014) Kap. 7.6.3:

„Ferner ist bei der Gestaltung der Riegel zu beachten, dass auf relativ langen NW-Schwellen auch kritische Fließtiefen und hohe Fließgeschwindigkeiten über längere Strecken erreicht werden, was den Aufstieg der Fische beeinträchtigen bzw. in Extremfällen sogar unterbinden kann.“

2 Bedarf

2.1 Allgemeine Erwägungen

BAW und BfG geben hiermit regelmäßig wiederkehrende Erfahrungen bei der Planung von Raugerinnen mit Beckenstruktur weiter.

2.2 Einfluss der Steingröße auf die Beckenplanung und Einbindetiefe der Steinriegel

Die Einbindetiefe von 0,3 m im Rechenbeispiel des DWA-M 509 (2014) auf S. 194 ff ist zu gering, um die Stabilität der Riegelsteine im Hochwasserfall sicherzustellen.

Erfahrungen zeigen, dass in der Vorplanung teilweise deutlich geringere Steindurchmesser angenommen werden, als am Ende im Bau verwendet werden. In diesem Fall wird die Dicke der Steinriegel und damit die Gesamtlänge der FAA in der Planung unterschätzt. Kann das Raugerinne mit Beckenstruktur später nicht um die Zusatzlänge größerer Steine verlängert werden, führt dies ggf. zu einer zu geringen lichten Beckenlänge bei der Umsetzung.

Die Steingröße ist technisch durch die Verfügbarkeit und die Einbaubarkeit (z.B. Tragkraft von Hebegeäten) begrenzt. Die verfügbaren Steingrößen begrenzen auch die möglichen Riegelhöhen und damit Wassertiefen (s.u.).

2.3 f-Faktor (Beiwert für Abfluss durch Lücken zwischen Riegelsteinen)

Das DWA-M 509 (2014) differenziert beim Faktor f nicht hinsichtlich der Breite eines Raugerinnes und der Anzahl bzw. Breite der ggf. bewusst eingeplanten Lücken zwischen Riegelsteinen. Praxiserfahrungen zeigen, dass der Faktor f mit 1,05 – 1,15 für den Abfluss zwischen den Steinen des Steinriegels für manche Anlagen zu gering gewählt ist, bzw. nicht allen Bauweisen und Materialien gerecht wird. Breite Steinriegel aus vielen Steinen, unregelmäßige Steine oder auch bewusst auf Abstand gesetzte Steine können zu einem größeren Gesamtanteil der zusätzlichen Lücken führen, sodass der hier vorkommende zusätzliche Abflussanteil durch den im DWA-M 509 (2014) vorgeschlagenen Korrekturfaktor f mit bis zu 1,15 nicht vollständig berücksichtigt wird. Dadurch wird unter Umständen ein zu kleiner Abfluss im Raugerinne berechnet. Dies gilt vor allem für Abflüsse, bei denen die Steinriegel noch nicht überströmt werden.

2.4 Überströmung von Steinriegeln

Aus den Aussagen des DWA-M 509 (2014) kann keine eindeutige Empfehlung, ob eine Überströmung und ggf. in welcher Höhe sie für die Funktionalität des fischpassierbaren Raugerinnes zulässig ist, abgeleitet werden.

Bei der Bemessung des Raugerinnes für Abflüsse zwischen Q_{30} und Q_{330} ist es notwendig, die Höhe der Steinriegel unter folgenden Aspekten abzuwägen:

- Es ist eine ausreichende Überströmung zur Vermeidung von Ablagerungen zu gewährleisten.

- Andererseits soll eine übermäßige Überströmung der Steinriegel vermieden werden, damit die Passierbarkeit des Raugerinnes gewährleistet ist.

Daneben ist das Raugerinne für höhere Abflüsse auch außerhalb des Funktionszeitraums statisch zu bemessen. Das heißt, die Standsicherheit ist bei Hochwasser bzw. beim für die Stabilität maßgebenden Abfluss, z. B. bei einem Fließwechsel im Bereich des Raugerinnes zu bemessen, s. a. 2.2.

2.5 Niedrigwasserschwellen

Niedrigwasserschwellen behindern u. U. die Durchgängigkeit für alle wandernden Tiere. Insbesondere bodennah wandernde Tiere und Makrozoobenthos werden durch die Schwellenwirkung und die Erhöhung der Fließgeschwindigkeiten im verbleibenden Querschnitt eingeschränkt. Zudem können die fischökologisch geforderten Mindestwassertiefen unterschritten werden. ...

3 Konkretisierung des DWA-M 509 (2014)

Die Steinriegel in Raugerinnen mit Beckenstruktur werden in der Regel aus großen Bruchsteinen aufgebaut. Zum besseren Verständnis der folgenden Erläuterungen ist in Abbildung 1 ein Schnitt durch einen Riegelstein schematisch abgebildet. Dabei bezeichnen

- h_s die nominelle Steinhöhe, bezogen auf die idealisierte Riegelgeometrie,
- h_o die Wassertiefe im Becken oberstrom des Steinriegels und
- h_u die Wassertiefe im Becken unterstrom des Steinriegels (für Raugerinne mit Beckenstruktur gilt $h_u = h_{eff}$).

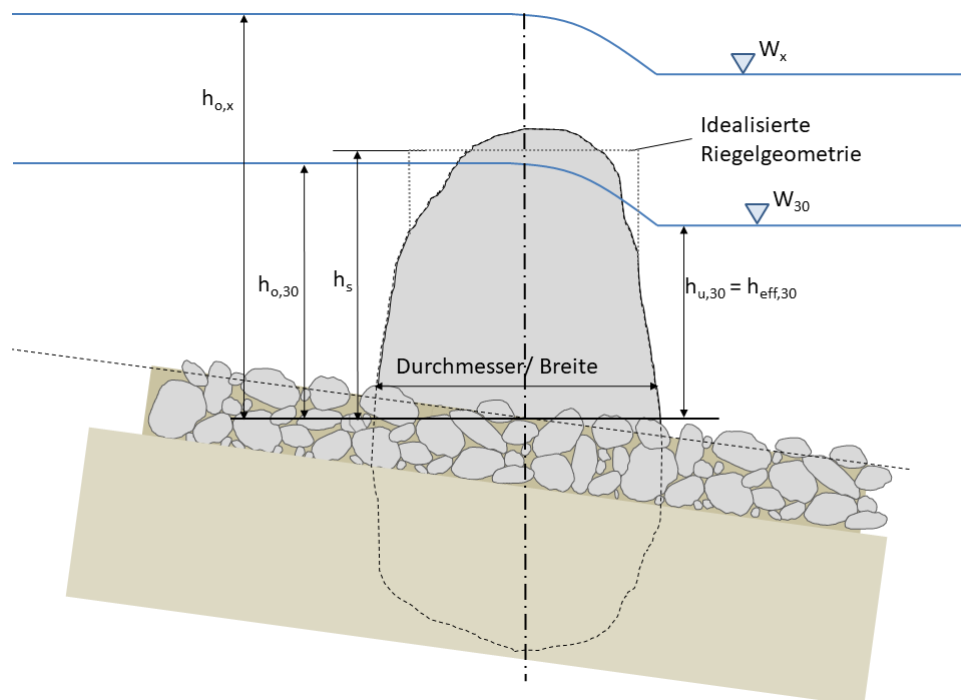


Abb 1: Systemskizze für einen Riegelstein in einem Raugerinne mit Beckenstruktur (nach DWA-M 509 (2014))

Bei der Bemessung von Raugerinnen mit Beckenstruktur sind verschiedene geometrische Mindestwerte für die Riegelbreite zu beachten (Abbildung 2):

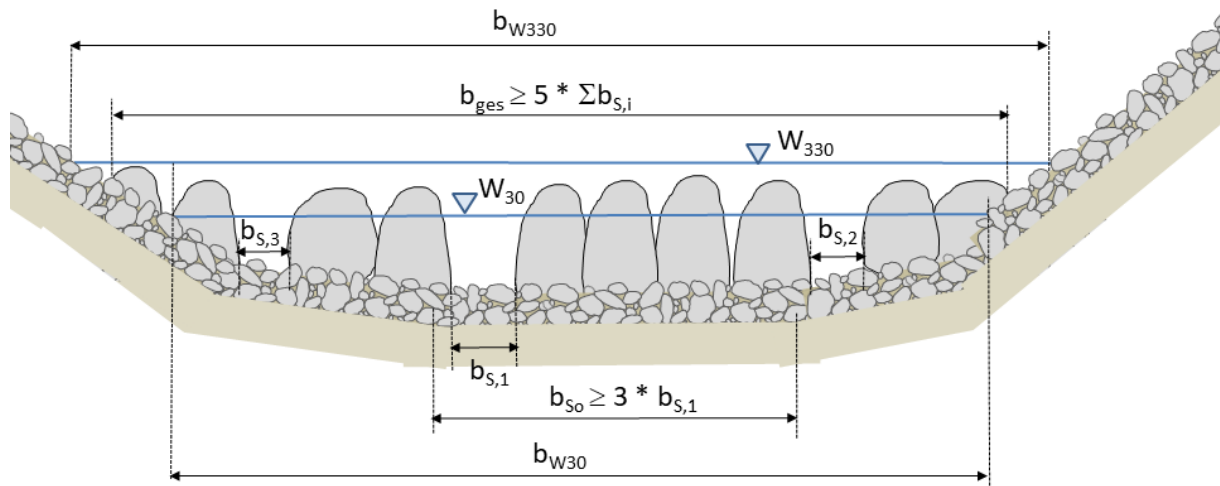


Abb 2: *Systemskizze eines Steinriegels in einem Raugerinne mit Beckenstruktur (Mindestbreiten nach DWA-M 509 (2014)), mit*
 $b_{s,x}$ Durchlassbreite, hier ist $b_{s,1}$ die Hauptöffnung
 b_{Wx} berechnete Riegelbreite bei Wasserstand W_x
 *b_{s0} Sohlbreite. Das Versatzmaß der Öffnungen soll größer als die doppelte Durchlassbreite sein und wird zwischen den Mittelachsen der Öffnungen bemessen, vgl. DWA-M 509 (2014) Abb. 178 und Gleichung 7.26a. Dadurch ergibt sich eine Mindestsohlbreite von $3 * b_{s,1}$ (Versatzmaß zzgl. der Restbreite der Öffnungen).*
 b_{ges} Gesamtbreite des Steinriegels. Diese soll mindestens das Fünffache der Summe der Durchlassöffnungen betragen, vgl. DWA-M 509 (2014) Gleichung 7.26b.

3.1 Allgemeine Erwägungen

Einbau von Steinriegeln:

Es wird empfohlen, dass die für Steinriegel in Raugerinnen mit Beckenstruktur verwendeten Steine hochkant aufgestellt werden. Sie sind aus Stabilitätsgründen ausreichend tief im Untergrund zu versenken. Ein Nachweis der Standsicherheit der Riegelsteine ist zu führen. Es wird auf die Empfehlung des DWA-M 509 (2014), S. 183 Bild 184 hingewiesen (Riegelsteine mit in Fließrichtung geneigter Kante einbauen, um eine gute Weiterleitung von Treibgut zu ermöglichen).

Durchlässe:

Es sollen in Fließrichtung möglichst "kurze" Durchlässe ausgebildet werden. Ansonsten wirken die Durchlässe nicht mehr als punktuelle Engstelle, so dass ggf. zu hohe Fließgeschwindigkeiten sowie zu niedrige Fließtiefen und Durchlassbreiten den Aufstieg der Fische und Neunaugen beeinträchtigen bzw. verhindern können. Bzgl. der Auswahl der Steinformen an den Durchlässen ist diesem Aspekt Rechnung zu tragen, um den Durchlass als punktuelle Engstelle bestmöglich zu realisieren.

Filterstabilität:

Erfahrungen zeigen, dass der Filterstabilität bei der Bemessung von Raugerinnen besondere Aufmerksamkeit zu schenken ist. Dies gilt u. a. auch für den Randbereich des Raugerinnes (Einbindung in das Ufer). Es wird auf DWA-M 509 (2014) Kap. 7.11.8 verwiesen.

Mögliche Wasserverluste durch die Sohle sind zu verhindern.

Verfügbarkeit von Steinen:

Steingröße und -herkunft inkl. der Transportwege können sich maßgeblich auf die Beschaffungskosten auswirken.

Sohlhöhe am Einstieg:

Es wird darauf hingewiesen, dass bei schwankenden Oberwasserständen die Sohlhöhe am Einstieg des Raugerinnes analog zu DWA-M 509 (2014) (S. 244, letzter Absatz) bemessen werden muss, da sonst die Fließgeschwindigkeiten im unteren Bereich des Raugerinnes zu groß werden können.

3.2 Steingröße

Die Steingrößen ergeben sich aus

- der fischökologisch erforderlichen Wassertiefe in den Becken,
- der statisch erforderlichen Einbindetiefe in den Untergrund / hydraulische Belastung.

Erfahrungswerte:

An Bundeswasserstraßen werden häufig große Steine benötigt. Die Steine haben je nach Gestein und Herkunft unterschiedliche Gestalt. Ein Teil der Steinlänge muss in der Regel aus Stabilitätsgründen im Untergrund und im Sohlsubstrat verbaut werden. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass Steine bis etwa 1,60 - 1,80 m Länge und einer Breite/Durchmesser von ca. 80 - 90 cm sinnvoll eingesetzt werden können. Größere Steine sind auf der Baustelle nur schwer zu verbauen, da dafür schwereres Gerät benötigt wird und die Einbaugenauigkeit leidet. Die im Raugerinne erreichbaren Wassertiefen sind durch die Steingröße und die Einbindung in den Untergrund begrenzt.

Für den Durchlass sind Steine mit einer schmalen Kante zu nutzen, um eine möglichst punktuelle Engstelle herzustellen.

Fazit:

- Die Einbindetiefe in den Untergrund ist über die Stabilitätsbemessung zu ermitteln.
- Die erforderliche Wassertiefe bei Q_{30} muss mit den verfügbaren Steinen erreicht werden können. Zur Überströmung der Steine bei höheren Abflüssen s. Kap. 3.4.
- Die Verfügbarkeit der erforderlichen Steine ist sicherzustellen.
- Der Steindurchmesser ist zeichnerisch realistisch darzustellen und im Planungsverlauf bzw. bei Beschaffung der Steine zu überprüfen.

3.3 f-Faktor (Beiwert für Abfluss durch Lücken zwischen Riegelsteinen)

Der Wertebereich für den Faktor f ($1,05 < f < 1,15$) im DWA-M 509 (2014) kann bei Steinriegeln mit mehreren Durchlässen, Steinriegeln mit sehr ungleichmäßigen Riegelsteinen oder bewusst auf Lücke gesetzten Riegelsteinen den Abfluss zwischen den Steinen unterschätzen. Die Folge kann ein Raugerinne sein, in dem die erforderlichen Wassertiefen bei niedrigen Abflüssen nicht erreicht werden. Falls zusätzlich zu den Durchlässen bewusst Lücken zwischen den Riegelsteinen gelassen werden, um z. B. die Passierbarkeit von kleineren aquatischen Organismen zu erleichtern, kann der Faktor f daher gegenüber den Angaben im DWA-M 509 (2014) angepasst werden.

Bei „geplanten“ Lücken kann Gleichung (1) für f verwendet werden:

$$f = 1 + n_L * b_L / \sum b_s \quad (1)$$

mit

f	f-Faktor zur Berücksichtigung der baubedingten Lücken zwischen zwei Riegelsteinen in Gleichung 7.23 (DWA-M 509 (2014))
n_L	Anzahl der Lücken zwischen den Riegelsteinen außer den Durchlässen
b_L	angenommene Breite einer Lücke zwischen zwei benachbarten Riegelsteinen (Mittelwert)
$\sum b_s$	Summe der Durchlassbreiten (geplante Hauptdurchlässe nach DWA-M 509 (2014))

Abweichend vom DWA-M 509 (2014) wird empfohlen, den Faktor f nur für den Abflussanteil anzusetzen, der durch die Steinriegel fließt, d. h. unterhalb der idealisierten Steinoberkante. Für den Abflussanteil oberhalb der Steinriegel, s. Gleichung (3).

Bemessung des Abflussanteils bis zur idealisierten Steinhöhe (Gleichung (2)):

$$Q = \frac{2}{3} * \mu * \sigma * f * \sum b_s * \sqrt{2 * g} * (h_o - w)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

mit

h_o	Wassertiefe oberhalb des Steinriegels
w	Höhe einer evtl. vorhandenen Niedrigwasserschwelle (nicht empfohlen), ohne Niedrigwasserschwelle ist $w = 0$

Bemessung des Abflussanteils, der im Fall überströmter Steinriegel oberhalb der Steinriegel abgeführt wird. Nach DWA-M 509 (2014): Wassertiefe bis max. zweifache Steinhöhe oberhalb der Sohle¹⁾ (Gleichung (3)):

$$Q = \frac{2}{3} * \mu * \sigma * b_{ges} * \sqrt{2 * g} * (h_o - h_s)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

mit

b_{ges}	Gesamtbreite des Steinriegels bzw. des Raugerinnes
h_s	idealisierte Riegelhöhe

Unter besonderen Verhältnissen ist es empfehlenswert, den f-Faktor in Gleichung (2) zu variieren:

- Bei geringem Wasserdargebot kann ein etwas höherer Wert f auf der sicheren Seite liegen, weil er den erforderlichen Durchfluss des Raugerinnes tendenziell überschätzt und dadurch das Raugerinne so bemessen wird, dass die erforderliche Wassertiefe nicht unterschritten wird.
- Bei Sensitivitätsprüfungen hinsichtlich der Überströmungshöhe der Steinriegel bei hohen Abflüssen kann zum Vergleich ein maximaler Wasserstand bei vollständig verschlossenen Lücken (außer planmäßige Durchlässe) berechnet werden. Dies dient z.B. der Kontrolle, ob bei Q_{330} noch Beckenabfluss vorliegt. Hier ist zu berücksichtigen, dass Gleichung (2) mit $f = 1$ nur bis zur Steinhöhe angesetzt wird, oberhalb ist Gleichung (3) zu verwenden. Die Sensitivitätsprüfung kann auch einen (Teil-)Verschluss der Lücken durch Treibgut abbilden, der sich je nach Gewässer im Laufe der Zeit einstellen kann.
- Bei der Prüfung der Wasserspiegel bei höheren Abflüssen sind Gleichungen (2) und (3) i. d. R. nicht anwendbar, da kein Beckenabfluss mehr vorliegt.

3.4 Überströmung von Steinriegeln

Im DWA-M 509 (2014) wird empfohlen, die Oberkante der Steinriegel so auszulegen, dass sie bei Q_{30} noch nicht überströmt werden (DWA-M 509 (2014), Bild 186). Dabei können die Steine 5 bis 10 cm über die Wasserlinie hinausragen. Idealerweise werden die Beckendimensionen so gewählt, dass sich bei Abflüssen bis Q_{330} noch Beckenabfluss (s. o.) einstellt (Wassertiefe entspricht max. 1,5-facher Riegelhöhe) und der Abfluss unter Einhaltung der max. zulässigen Leistungsdichte abgeführt werden kann. Werden die Steinriegel zu selten überströmt, kann Treibgut weniger effektiv weitergeleitet werden (vgl. DWA-M 509 (2014) S. 183).

¹⁾ Dieser Geltungsbereich bezieht sich nur auf die hydraulische Bemessung des Abflusses. Bereits ab einem Wasserspiegel von ca. 1,5-facher Steinhöhe ist gemäß DWA-M 509 (2014) kein Beckenabfluss mehr vorhanden, der als Voraussetzung für die fischökologische Passierbarkeit des RGMBS gilt.

Bei gewässerbreiten Raugerinnen ist es möglich, dass einzelne Wanderkorridore nicht über den gesamten Zeitraum für alle Fisch- und Neunaugenarten auffindbar oder passierbar sind. Daher kann es erforderlich sein, dass Raugerinne in Bereiche mit verschiedenen Sohlhöhen (z. B. Niedrig-, Mittel- und Hochwasserrinnen) zu strukturieren. Dadurch können bei Abflüssen, die bspw. die Niedrigwasserrinne überlasten (hydraulische Grenzwerte wie Geschwindigkeit und Leistungsdichte können nicht eingehalten werden), alternative Wanderkorridore angeboten werden. Das Gesamtbauwerk muss in der Lage sein bei allen Abflüssen zwischen Q_{30} und Q_{330} geeignete und durchgehende Wanderkorridore zur Verfügung zu stellen.

3.5 Niedrigwasserschwellen

Eine Planung ohne Niedrigwasserschwelle ist zu bevorzugen, sofern ausreichend Abfluss im Gewässer zur Verfügung steht.